جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سی و یکم، پاییز ۱۳۹۸

صص ۷۵- ۵۹

DOI: https://doi.org/10.22067/geo.v8i3.81998

برآورد میزان رواناب حوضه آبریز لنبران چای در استان آذربایجان شرقی: کاربرد مقایسه‌ای روش‌های واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT

محمدحسین رضائی مقدم[1] – استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

میراسدالله حجازی – دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

عبدالله بهبودی – دانشجوی ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/٤/۲۵ تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۹/۱۷

چکیده

شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ها، پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز و درک درست از مؤلفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژیکی برای برنامه‌ریزی و حفاظت از منابع آبی ضرورت دارد. از طرف دیگر، نبود برآورد مناسب رواناب حاصل از بارش در حوضه‌های آبریز، مدیریت بهینه منابع آب به‌ویژه مدیریت بهره‌برداری از سدها و شبکه آب‌رسانی را دچار مشکل می‌نماید. در این پژوهش، بیلان آبی حوضه آبریز لنبران با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شد. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT از دو روش GLUE و SUFI-2 استفاده شد. نتایج حاصل با استفاده از چهار معیار ارزیابی مدل‌ها شامل معیار نش ساتکلیف، ضریب تبیین، نسبت باقیمانده میانگین مربعات خطا به انحراف از معیار داده‌های مشاهداتی و دو فاکتور p-factor و r-factor مقایسه شدند. نتایج حاصل از کاربرد این دو روش نشان داد که روش SUFI-2 دارای الگوریتم موثرتری برای واسنجی و تعیین عدم قطعیت مدل در این حوضه است. بر این اساس با اطمینان بیشتری می‌توان از مدل SWAT واسنجی شده با الگوریتم SUFI-2 در مدیریت منابع آب، کمی سازی سناریوهای تغییر اقلیم و تغییر کاربری در داخل حوضه استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: لنبران چای، روش SUFI-2، واسنجی، مدل SWAT.

[1] نویسنده مسئول: ۰۹۱٤٤۱٤۲۱۹۰

Email: rezmogh@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

حفاظت از منابع آب‌وخاک ازجمله راهکارهای مهم مدیریت اصولی و صحیح حوضه‌های آبریز است؛ بنابراین فرسایش و نگرانی‌های مربوط به تغییر کاربری، اهمیت پیش‌بینی اثرات این اقدامات را بر منابع آب خاک بیشتر نمایان می‌کند. ازاین‌جهت ضرورت مدل‌سازی و ارزیابی نتایج آن‌ها ضروری می‌باشد. اغلب سازندهای تشکیل دهنده حوضه آبریز لنبران چای به علت ویژگی‌های خاص لیتولوژی دارای حساسیت بالایی نسبت به فرسایش بوده و عمدتاً از نفوذپذیری کمتری برخوردارند و باعث ایجاد رواناب سطحی می‌گردد. همچنین اختلاف ارتفاع زیاد حوضه، کمبود یا فقدان پوشش گیاهی، غیر اصولی بودن عملیات کشت، تغییر مداوم کاربری اراضی، آتش زدن پوشش گیاهی، چرای بیش‌ازحد و لگدکوب شدن خاک توسط احشام این امر را تشدید می‌کند؛ بنابراین برای مدیریت بهتر اطلاع از بیلان آبی حوضه‌های آبریز ضروری می‌باشد و به دلیل وقت‌گیر و پرهزینه بودن اندازه‌گیری اجزای بیلان آب، مدل‌سازی پدیده‌های هیدرولوژی در حوضه آبریز می‌تواند راه‌حل بهینه‌ای برای آن‌ها باشد (زارع کاریزی و طالبی، ۱۳۹۵)؛ بنابراین آگاهی دقیق از رفتار هیدرولوژیک حوضه‌های آبریز می‌تواند به شبیه‌سازی بهتر این محیط به‌منظور کنترل مؤلفه‌های اصلی بیلان آب کمک شایانی نماید (مؤذن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵). از طرفی شبیه‌سازی فرآیندهای آب‌شناختی به دلیل هزینه‌های زیاد برای اندازه‌گیری و محدود بودن داده‌های در دسترس از اهمیت خاص و ویژه‌ای برخوردار است (Silva et al., 2007, Ndomba et al., 2008, Shimelis et al., 2010 وکاویان و همکاران، ۱۳۹۲)؛ اما کمبود آمار، اطلاعات و منابع از موانع اصلی مسیر هر پژوهش می‌باشد بنابراین به روشی احتیاج است تا به‌وسیله آن بتوان آمار موجود را برای حوضه‌های آبریز بدون آمار یا مکان‌های تعمیم داد که اندازه‌گیری در آن‌ها امکان‌پذیر نیست (Pisinaras et al., 2010). مدل‌های زیادی برای شرح و پیش‌بینی هیدرولوژی آبریز پیشنهاد شده است که از نظر اهداف و مقیاس زمانی و مکانی بسیار متفاوت هستند (Setegn et al., 2010). مدل‌های نیمه توزیعی هیدرولوژیکی مانند مدل SWAT اخیراً به‌طور گسترده‌ای برای مدیریت حوضه آبریز به کار گرفته می‌شوند (عینی و همکاران، ۱۳۹۷). توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی پیچیده حوضه‌های آبریز در محیط GIS این مدل را نسبت به مدل‌های یکپارچه که در آن‌ها واحدهای کاربری بزرگ‌تر، مبنای عمل هستند، متمایز ساخته است (اکبری، ۱۳۹۲). از میان داده‌های ورودی مدل SWAT، نقشه‌های توزیعی خاک و کاربری اراضی به دلیل در دسترس بودن، حساسیت کمتر مدل به تغییرات این نقشه‌ها و همچنین تغییرات نسبتاً کم آن در طول زمان و اساساً به دلیل پیشرفت‌های صورت گرفته در سنجش‌ازدور با اطمینان بالایی در کارهای مدل‌سازی به کار گرفته می‌شوند (Grusson et al., 2017). مدل SWAT یکی از مدل‌های است که تحقیقات گسترده‌ای در سطح جهان و ایران در زمینه‌های مختلف هیدرولوژی و مدیریت حوضه‌های آبریز صورت گرفته است که به برخی از کارهای انجام شده در ایران و جهان اشاره می‌شود.

(Sun & Seidou, 2015) در پژوهشی با استفاده از مدل SWAT نشان دادند که واسنجی یک مدل هیدرولوژیکی با استفاده از الگوریتم‌های متداول واسنجی خودکار لزوماً دقت مناسبی در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی در دوره اعتبارسنجی به وجود نخواهد آورد. (فرامرزی و همکاران، ۲۰۰۹) با استفاده از مدل SWAT اجزای بیلان آب را در کل ایران شبیه‌سازی کردند. سپس ارتباط آن‌ها را با تولید گندم با در نظر گرفتن عملکرد سدها و اقدامات آبیاری اراضی کشاورزی بررسی و مطالعه نمودند. (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۷) برای شبیه‌سازی فرآیندهای مؤثر بر بیلان آب، رسوب و عناصر غذایی در حوضه آبریز رودخانه تور کشور سوئیس از مدل SWAT استفاده کردند. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی رواناب و نیترات بسیار خوب و شبیه‌سازی رسوب و فسفر نسبتاً خوب صورت گرفته است. (Li et al., 2007) در تحقیق خود در حوضه‌ای در غرب آفریقا با استفاده از مدل SWAT نشان دادند که تغییر کاربری حوضه‌ها از جنگل، مرتع و بوته زار به اراضی کشاورزی و یا مناطق شهری سبب تغییر واکنش هیدرولوژی حوضه می‌گردد. بیات و همکاران (۱۳۹۷) از مدل SWAT برای جذب داده – پیش‌بینی استفاده نمودند نتایج نشان می‌دهد که روند همزمان واسنجی – پیش‌بینی با استفاده از الگوریتم EnKF برای این مدل باعث دقت پیش‌بینی می‌شود. گودرزی و فاتحی فر (۱۳۹۸) با استفاده از مدل SWAT در اثر تغییرات اقلیمی تحت سناریو RCP 8.5 به پهنه‌بندی سیلاب در حوضه آذرشهرچای پرداختند. شفیعی مطلق و همکاران (۱۳۹۷) تأثیر کاربری اراضی را بر رواناب رودخانه مارون با استفاده از مدل SWAT بررسی نمودند نتایج نشان داد که در منطقه سناریوی بدبینانه اتفاق است و با ادامه روند تخریبی مقادیر مختلف رواناب افزایش و نفوذپذیری و آب گذری به آبخوان‌های سطحی و عمیق کاهش می‌یابد. بصیری و همکاران (۱۳۹۳) پژوهشی با عنوان تأثیر مقیاس نقشه خاک بر مدل SWAT در شبیه‌سازی روند جریان رواناب ماهانه در حوضه آبریز تویسرکان انجام دادند. نتایج نشان داد که تنوع خاک‌های منطقه مطالعاتی نقش مهمی در نتایج مدل ایفا می‌کند.

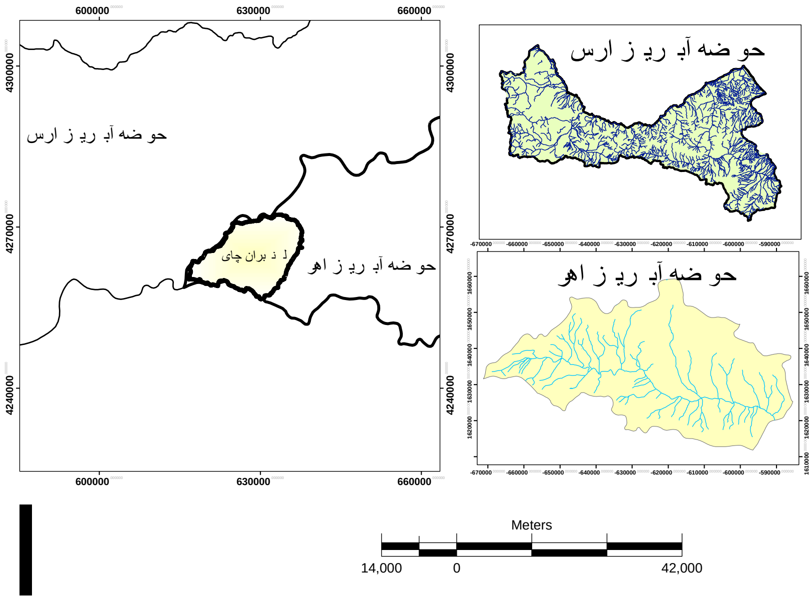
(عارفی اصل و همکاران، ۱۳۹۲؛ بسالت پور و همکاران، ۱۳۹۳؛ نظری پویا و همکاران،۱۳۹٤؛ ناصرآبادی و همکاران، ۱۳۹۵؛ غلامی و همکاران، ۱۳۹٦؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹٦؛ اعلمی و همکاران، ۱۳۹۷؛ حبیبی و همکاران، ۱۳۹۷) در حوضه‌های متفاوت در نقاط مختلف ایران با مدل SWAT به شبیه‌سازی رواناب پرداختند. به‌طورکلی هدف از انجام این پژوهش‌ها عمدتاً برای برآورد میزان رواناب و رسوب جهت بررسی تغییرات کاربری و مدیریت بهینه منابع آبی در حوضه آبریز بوده است.

۲- مواد و روش

۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

زیر حوضه لنبران در سمت ضلع شرقی رودخانه اهرچای واقع شده است. مساحت این زیر حوضه ۲۰۱۱۸ هکتار می‌باشد و سرشاخه اصلی رودخانه اهرچای محسوب می‌شود. محدوده مورد مطالعه در بین مختصات

جغرافیایی ۱۷′ □۲۰ °۴۶ تا ۴۵′ □۳۴ °۴۶ طول‌های شـــرقی و ۴۹″ □۲۶ °۳۸ تا □″ ۲۳ □۳۵ °۳۸ عرض‌های شـــمالی قرارگرفته اســت. این حوضــه از نظر تقسـیمات کشـوری در دهســتان سینا از بخش مرکزی شهرستان ورزقان از توابع استان آذربایجان شرقی واقع شده است (شکل ۱).



شکل شماره ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه.

۲-۲- مدل SWAT

SWAT نمونه‌ای از مدل‌های فیزیک پایه اســت که با حل معادلات اساسی فیزیک به شبیه‌سازی فرآیندهای سیستم آبریز می‌پردازد. این مدل به لحاظ مقیاس فضــایی نیمه توزیعی و از نظر زمانی مدلی پیوســته اســت. کوچک‌ترین واحد کاری در این مدل واحد واکنش هیدرولوژیک HRU[1] اســـت که از ترکیب نقشـــه‌های طبقات شـــیب، خاک و کاربری اراضـی حاصـل می‌شود. آب موجود در خاک، رواناب سطحی، رسوب و عناصر شیمیایی ابتدا برای هر HRU و سپس هر زیر حوضــه و در آخر کل حوضه آبریز محاسبه می‌شود. شبیه‌سازی سیستم آبریز در مدل SWAT را می‌توان به دو بخش کلی تقســـیم نمود: فاز زمینی و فاز آبی، فاز زمینی مربوط به فرآیندهای ســـطح زمین و ورود آب، رســـوب و عناصـر شـیمیایی به آبراهه اصـلی هر زیر حوضـه است. فاز آبی فرآیندهای آبراهه‌ها و کانال‌های جریان شامل حرکت آب، رســـوب و مواد شـــیمیایی را شـــبیه‌ســـازی می‌کند (Neitch et al,. 2005). شـــبیه‌ســـازی بخش زمینی چرخه هیدرولوژیک در مدل SWAT بر پایه رابطه بیلان آبی رابطه (۱) صورت می‌گیرد.

1 Hydrological Response Unit

$$sw_t = sw_0 + \sum_{i=1}^{t}\left(R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}\right)$$ رابطه (۱)

کـه در این معـادلـه SW_t مقدار نهایی رطوبت خاک (میلی‌متر)، SW_0 مقدار اولیه رطوبت خاک (میلی‌متر)، t زمان (روز)، R_{day} مقـدار بارش در روز i ام (میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب در روز i ام (میلی‌متر)، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (میلی‌متر)، W_{seep} مقدارنشـــت که در روز i ام از نیمرخ خاک وارد منطقه غیر اشـــباع می‌شـــود (میلی‌متر)، Q_{gw} مقدار آب بازگشـــتی در روز i ام (میلی‌متر) می‌باشـــد. در مدل SWAT پروفیل خاک به چندین لایه تقســـیم می‌شـود و فرآیندهای حرکت آب در خاک شـامل رواناب سطحی، نفوذ، تبخیر، جذب توسط گیاهان، جریان جانبی و نفوذ عمقی به سـفره‌های آبی کم عمق و عمیق می‌باشـد. شـبیه‌سـازی رواناب سطحی با روش اصلاح شده SCS[1] (در صـورت وجود بارش روزانه) یا روش گرین – آمپت[2] (در صورت وجود داده‌های بارش ساعتی) انجام می‌شود. برای شـبیه‌سـازی حرکت آب در داخل لایه‌های خاک از روش روندیابی مخزن اسـتفاده می‌شـود. جریان اشـباع به‌صـورت مسـتقیم و جریان غیر اشـباع بین لایه‌های خاک به‌طور غیرمسـتقیم با محاسـبه جذب گیاهی و تبخیر از سـطح خاک شـــبیه‌ســـازی می‌شـــود. جریان آب به ســـمت لایه‌های پایین زمانی اتفاق می‌افتد که میزان آب در یک لایه از خاک از ظرفیت مزرعه تجاوز کند و لایه زیرین نیز غیراشـباع باشـد. جریان جانبی با اسـتفاده از روش روندیابی مخزن جنبشی (Solan et al., 1983). بر مبنای درجه شـیب، طول شـیب و هدایت هیدرولیکی اشباع، مدل‌سازی می‌شود. ما بقی آب نفوذ یافته، به سـفره‌های کم عمق زیر زمینی وارد می‌شـود. برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل، روش‌های هارگریوز – سـامانی[3]، پریسـتلی – تیلور[4] و پنمن – مانتیث[5] موجود می‌باشد. مدل SWAT تبخیر از سطح خاک و تبخیر از گیاه را به‌صـورت مجزا مطابق روش ریچی (Ritchie, 1972) محاسـبه می‌کند. تبخیر از سطح خاک با یک تابع نمایی از عمق خاک و میزان آب خاک برآورد می‌شـــود. تبخیر از گیاهان نیز با یک تابع خطی از تبخیر و تعرق پتانســـیل، شـــاخص ســـطح برگ، عمق ریشـــه و میزان آب خاک مدل‌ســـازی می‌شـــود. میزان رطوبت لایه‌های مختلف خاک در هر زمان و مکان با در نظر گرفتن مجموع عوامل فوق برآورد می‌شـــود. پس از تعیین رواناب ســـطحی با روش شـــماره منحنی یا گرین – آمپت، مقدار رواناب وارد شـده به کانال آبراهه محاسـبه می‌شـود. معادله مانینگ[6] برای تعیین سرعت جریان و روش ذخیره متغیر یا ماسـکینگام[7] برای روندیابی جریان آب در کانال اسـتفاده می‌شـود. در ضمن، تلفات انتقال آب در مسـیر کانال و تأخیر زمانی رواناب سـطحی برای حوضـه‌های آبریز بزرگ که زمان تمرکز آن‌ها بیش از یک روز است نیز در نظر گرفته می‌شود.

1 Soil conservation service
2 Green-Ampt
3 Hargreaves-Sammani
4 Priestly- Tailor
5 Penman-Mantit
6 Manning formula
7 Muskingum Model

۲-۲-۱- روش تعیین عدم قطعیت GLUE

این روش اولین بار توسط (Beven & Binley, 1992,.) به‌عنوان روشی جدید که معمولاً با مدل‌های شبیه‌سازی زیست‌محیطی به کار می‌رود، معرفی گردید. در این روش عدم قطعیت شامل سه نوع عدم قطعیت داده‌های ورودی، ساختار مدل و عوامل خواهد بود زیرا مقدار تابع درست نمایی با مجموعه عوامل در ارتباط بوده و به‌طور ضمنی منشأ همه خطاها و تأثیر کواریانس مقادیر عوامل بر عملکرد مدل را منعکس می‌کند. روش GLUE شامل سه مرحله زیر می‌باشد:

۱- بعد از تعریف تابع درست نمای تعمیم یافته L(Θ) تعداد زیادی مجموعه عوامل به‌صورت تصادفی از توزیع احتمال پیشین انتخاب می‌شود و بر اساس مقدار تابع درست نمایی و معیار حدی تعریف شده، هر مجموعه از عوامل به‌صورت هم رفتار یا غیر هم رفتار طبقه‌بندی می‌شود.

۲- هر مجموعه از عوامل هم رفتار براساس رابطه زیر وزن دهی می‌شود.

$$w_i = \frac{L(\theta_i)}{\sum_{K=1}^{N} L(\theta_k)}$$ رابطه (۲)

۳- درنهایت عدم قطعیت پیش‌گویی بر اساس توزیع تجمعی تابع درست نمایی مربوط به عوامل هم رفتار توضیح داده می‌شود.

۲-۲-۲- روش تعیین عدم قطعیت SUFI-2

در روش SUFI-2 همانند GLUE سنجش میزان عدم قطعیت در مدل‌سازی شامل عدم قطعیت در ورودی‌ها، مدل مفهومی، عوامل می‌باشد و توسط معیار p – factor ارزیابی می‌گردد که بیانگر درصد داده‌های اندازه‌گیری شده که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گرفته‌اند می‌باشد. مراحل انجام کار به‌صورت زیر می‌باشد:

۱- در مرحله اول تابع هدف g(Θ) و بازه عوامل $\{\Theta_{abs\,min} . \Theta_{abs\,max}\}$ تعریف می‌شوند.

۲- از روش نمونه برداری لاتین مکعبی در بازه تعریف شده در مرحله قبل، جهت تولید مجموعه عوامل و مقدار تابع هدف به ازای هر مجموعه از عوامل استفاده می‌شود. مقادیر تابع هدف با استفاده از ماتریس ژاکوبین j و ماتریس و کواریانس عوامل c مطابق رابطه زیر ارزیابی می‌گردد (S_g^2 واریانس مقادیر تابع هدف از m بار اجرای مدل و n تعداد عوامل).

$$J_{ij} = \frac{\Delta_{gi}}{\Delta\theta_j} . i = 1.\cdots c_2{}^m . = 1.\cdots .n$$ رابطه (۳)

$$C = S_g^2 (J^T J)^{-1}$$

۳-۹۵ درصد از بازه پیش گویی شده هر کدام از عوامل از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

رابطه (٤)

$$\theta_{j.lower} = \theta_j^* - t_{v.0.025}\sqrt{cjj}$$
$$\theta_{j.upper} = \theta_j^* + t_{v.0.025}\sqrt{cjj}$$

که در آن θ_j^* مقدار پارامتر θ_j در تابع هدف بهینه می‌باشد v درجه آزادی یا m-n می‌باشد.

٣- بازه 95ppu محاسبه شده سپس دو شاخص p-factor درصد داده‌های مشاهداتی که در بازه 95ppu قرار می‌گیرند و شاخص r- factor از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$r - factor = \frac{\frac{1}{n}\sum_{tj=1}^{n}(Y_{tj.97.5\%}^{M} - Y_{tj.2.5\%}^{M})}{Q_{obs}}$$ رابطه (٥)

که در آن $y^{M}_{tj.2.5\%}$ و $y^{M}_{tj.97.5\%}$ معرف مرز بالا و پایین عدم قطعیت 95ppu و Q_{obs} انحراف از معیار داده‌های مشاهداتی می‌باشد. بهترین نتیجه زمانی خواهد بود که ١٠٠ درصد داده‌های اندازه‌گیری با 95ppu پوشانده شود یا بعبارت دیگر میزان p-factor برابر ١ شود و r- factor کمتر و به صفر نزدیک باشد. در صورتی که مقادیر دو شاخص مذکور رضایت بخش باشد، بازه تعریف شده عوامل به‌عنوان توزیع احتمال پسین خواهد بود در غیر این صورت بازه جدید عوامل بر اساس رابطه زیر محاسبه شده و تمام مراحل ١ تا ٤ تکرار خواهد شد.

رابطه (٦)

$$\theta_{j.\min.new} = \theta_{j.lower} - \max(\frac{\theta_{j.lower} - \theta_{j.\min}}{2} . \frac{\theta_{j.\max} - \theta_{j.upper}}{2})$$
$$\theta_{j.\max.new} = \theta_{j.upper} + \max(\frac{\theta_{j.lower} - \theta_{j.\min}}{2} . \frac{\theta_{j.\max} - \theta_{j.upper}}{2})$$

در روش SUFI-2 فرض می‌شود که هر پارامتر ناشناخته به‌طور یکنواخت در یک دامنه با عدم قطعیت معین توزیع شده است لازم به ذکر است در هر دو روش، درجه عدم قطعیت از دو فاکتور p-factor و r- factor محاسبه می‌گردد.

٢-٣- معیارهای عملکرد

جهت تعیین میزان کارایی دو روش از ٤ معیار عملکرد مدل‌ها استفاده شده است. مقدار R^2 بیانگر ارتباط خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و واقعی بوده که مقدار آن بین صفر تا یک متغییر است. ضریب NS بزرگی نسبی واریانس باقیمانده را در مقایسه با واریانس داده‌های مشاهداتی تعیین می‌کند. (Motovilov et al,. 1999) در بررسی تعیین عملکرد مدل‌ها به این نتیجه رسیدند که اگر مقدار ضریب NS بیش از ٠/٧٥ باشد شبیه‌سازی خوب و مقادیر بین ٠/٣٦ و ٠/٧٥ شبیه‌سازی قابل قبول و کمتر از ٠/٣٦ غیر قابل قبول خواهد بود. پارامتر RSR با استاندارد نمودن مقادیر باقیمانده میانگین مربعات خطا RMSE با استفاده از انحراف معیار مقادیر مشاهداتی به دست می‌آید. برای این

معیار مقادیر بالای ۰/۷ قابل قبول می‌باشـــد. معیار bR^2 که در آن ضـــریب تعیین R^2 در ضـــریب خط رگرســـیون بین داده‌های مشـاهداتی و شـبیه‌سـازی شـده ضرب شده است. مقدار بهینه آن یک می‌باشد با افزایش گام زمانی معیارهای ارزیابی ســخت‌تر خواهد شــد و بالعکس (Moriasi et al, 2007). بر این اســاس با توجه به اینکه مدل در گام زمانی روزانه اجرا شده است معیارهای مذکور می‌تواند با سخت گیری کمتری نسبت به گام زمانی ماهانه بررسی شود.

۲-٤- داده‌ها

داده‌های مورد اسـتفاده در این پژوهش شـامل نقشـه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سـازمان نقشـه برداری، کاربری اراضی، خاک، بارش، دمای حداقل و حداکثر، سـرعت باد، تشـعشع خورشیدی و رطوبت نسبی روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک اهر، تبخیر سنجی ورزقان و باران سنجی اویلق و دبی ایستگاه کاسین می‌باشد که (جدول ۱).

جدول ۱- داده‌های مورد استفاده در مدل SWAT و واسنجی مدل.

ردیف	داده	منابع	بازه اطلاعاتی	توضیحات	کاربرد
۱	مدل رقومی ارتفاعی	نقشه برداری	****	۱:۲۵۰۰۰	ورودی SWAT
۲	نقشه کاربری اراضی	منابع طبیعی	****	تصاویر لندست	ورودی SWAT
۳	نقشه خاک	منابع طبیعی	****	۱:۲۰۰۰۰	ورودی SWAT
٤	داده‌های هواشناسی	هواشناسی	۲۰۱٦-۲۰۰۰	ایستگاه اهر و ورزقان	ورودی SWAT
٥	داده‌های بارندگی	سازمان آب و هواشناسی	۲۰۱٦-۲۰۰۰	اویلق	ورودی SWAT
٦	دبی ماهانه	سازمان آب	۲۰۱٦-۲۰۰۰	ایستگاه کاسین	واسنجی SWAT

در حوضـه آبریز لنبران چای از نقشـه خاک و نقشـه کاربری اراضـی تفضـیلی تهیه شده توسط منابع طبیعی استان آذربایجان شـرقی اسـتفاده شده است براساس این نقشه‌ها در کل حوضه هفت کلاس بافت خاک قابل تفکیک می‌باشد. همچنین براسـاس نقشـه کاربری اراضـی، شش طبقه کاربری اراضی در منطقه شناسایی گردید. حوضه مورد مطالعه به ۱۷ زیر حوضـه و ٤٦٩ واحد هیدرولوژیکی تقسـیم گردید. از سـال آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۳ برای گرم کردن مدل از ۱۰ سال برای واسنجی و ٤ سال برای اعتبار سنجی استفاده شده است.

٥- نتایج و بحث

پس از پارامتر سـازی و ورود داده‌ها، شـبیه‌سـازی برای یک دوره ۱۷ ساله از ۱ ژانویه ۲۰۰۰ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۱٦ بر اسـاس گام زمانی ماهانه صـورت گرفت. به‌منظور تعیین درجه حساسیت پارامترهای جریان در مدل SWAT با استفاده از دو روش SUFI-2 و GLUE حسـاسـیت سـنجی برای ۲۲ پارامتر انتخابی، انجام گردید. با اسـتفاده از نتایج صحت

سـنجی در مورد حذف پارامترهایی که دارای درجه حسـاسیت کمتر می‌باشند از فرآیند واسنجی تصمیم گیری می‌شود که درنهایت پارامترهای با درجه حسـاسـیت کمتر حذف گردید و ۱۵ پارامتر که حسـاسـیت بیشـتری داشـتند انتخاب گردید. بین ۱۵ پارامتر حسـاس مدل SWAT به عوامل چگالی توده خاک، هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشـباع، ضـریـب تبخیر آب زیر زمینی، ثـابـت تخلیـه جریان از کانال، درجه حرارت ریزش برف، درجه حرارت ذوب برف حسـاسـیت بیشـتری دارد. مهم‌ترین عواملی که برای واسـنجی و تعیین عدم قطعیت مدل اسـتفاده شـده است به همرا مقادیر اولیه و مقدار واسـنجی شـده در (جدول ۲) آورده شـده اسـت. نتایج نهایی معیارهای ارزیابی مدل در دوره واسـنجی و اعتبار سـنجی رواناب در (جدول ۳) ارائه شـده اسـت. طبق نظر (Moriasi et al, 2007)، (Ayele et al., 2017)؛ کرمی و خطیبی (۱۳۹۸) اگر ضـریب کارایی مدل نش – سـاتکلیف در ارزیابی مدل بین ۰/۷۵ – ۰/٦٥ باشـد نتیجه شـبیه‌سـازی خوب اسـت (جدول ٤). همچنین با مقایسـه ضریب تبیین بین رواناب واقعی و شبیه‌سازی شده در دوره واسـنجی و اعتبار سـنجی می‌توان گفت رابطه معنی دار و خوبی بین آن‌ها وجود دارد که این موضـوع با نتایج رضـا زاده و همکاران (۱۳۹۷)، عینی و همکاران (۱۳۹۷) و محمدی و همکاران (۱۳۹٦) مطابقت دارد. هر چند کاربرد روش SUFI-2 آسـان می‌باشـد ولی کاملاً خود کار نیست در استفاده از این روش لازم است توزیع پسین عوامل در هر تکرار جهت اصـلاح بازه پیشـنهادی جدید (توزیع پیشـین) تکرار بعدی بررسـی گردد. واسـنجی مدل برای رواناب در یک مرحله با تعداد ۹۰۰ شـبیه‌سـازی در سه تکرار انجام گردید فرآیند واسنجی زمانی به پایان می‌رسد که براساس تابع هدف ضـرایب مورد نیاز جهت ارزیابی در حد قابل قبول باشـند (جدول ۳). اشـکال ۲ و ۳ دبی شـبیه‌سـازی شـده و مشـاهده‌ای را به ترتیب در واسـنجی و اعتبارسـنجی نشـان می‌دهد. تمام معیارهای ارزیابی مدل در شبیه‌سازی رواناب در حد مجاز می‌باشد.

جدول ۲- پارامترهای حساس به همراه توزیع پیشین و پسین و مقدار بهینه آن‌ها جهت استفاده در واسنجی رواناب در دو روش SFI-2 و GLUE در حوضه آبریز لنبران.

پارامتر	علامت اختصاری	SUFI-2			GLUE		
		حداقل	حداکثر	بهینه	حداقل	حداکثر	بهینه
شماره منحنی SCS	r_CN2	۰/۲	-۰/۲	۰/۰۸٦	-۲۵	۲۵	-۰/۲٦
عمق آستانه شروع جریان زیر زمینی	V_GWQMN	۲	۰	۱/٤	٤٥۰	۲۵۰۰	۱۰۸۰
ضریب انتقال از سفره کم عمق به عمیق	V_RCHRG	۱	۰	۰/۲۲	۰/۲	۱	۰/۹
ثابت تخلیه جریان از کانال	V_ALPHA	۱	۰	۰/۲۵	۰	۰/۵	۰/۱۱
فاکتور جبران تبخیر از خاک	V_ESCO	۱	۰/۰۱	۰/۸۲	۰/۲	۱	۰/۳۳
هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع mm/h	r_SOL_K(1)	۰/۰۸	-۰/۸	-۰/۵۵	-۲۵	۲۵	۰/۰۳
متوسط شیب واحدهای هیدرولوژیک	r_SLSUBBSN	۰/۲	۰	۰/۰۱	-۲۵	۲۵	۹/۲

ادامه جدول ۲

پارامتر	علامت اختصاری	SUFI-2			GLUE		
		حداقل	حداکثر	بهینه	حداقل	حداکثر	بهینه
ظرفیت آب قابل دسترس در لایه خاک/ mm	r_SOL_AWC	۰/٤	-۰/۲	-۰/۰۳	-۲٥	۲٥	۰/۱
چگالی توده خاک	r_SOL_BD	۰/٦	-۰/٥	۰/٥	-۲٥	۲٥	۰/۰۳
درجه حرارت ریزش برف/ سانتی گراد	V_SFTMP	٥	-٥	٤/۸	-۱	۲	۰/٦
ضریب ذوب برف / سانتی گراد	V_SMFMX	۱۰	۰	۲/۸	۰	۱۰	٥/۳
فاکتور جریان برداشت آب گیاه	V_EPCO	۱	۰/۰۱	۰/٦	۰/۱	۱	۰/۳۱
ضریب تبخیر آب زیر زمینی	V_GW_REVAP	۰/۲	۰	۰/۱	۰	۱/٥	۰/۷
ضریب زبری دامنه	V_OV_N	۱	۰	۰/۹۸	۰/۲	۱	۰/٥٥
درجه حرارت ذوب برف/ سانتی گراد	V_SMTMP	٥	-٥	٤/۱	۰	۳	۲/۱

جدول ۳- نتایج نهایی معیارهای ارزیابی مدل در دوره واسنجی و اعتبار سنجی رواناب در حوضه آبریز لنبران.

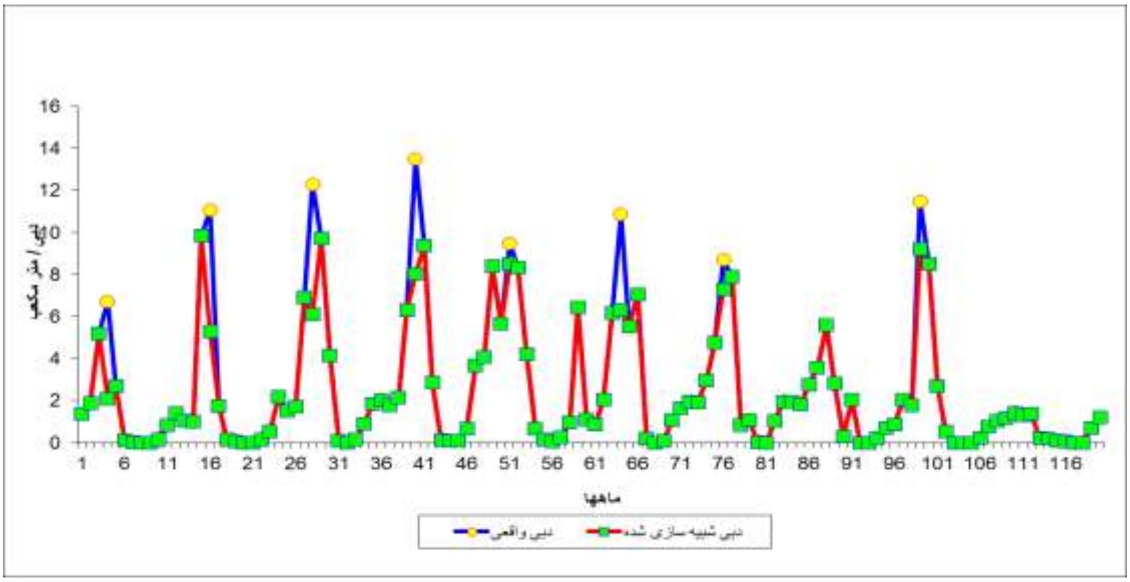
NS	R^2	r-factor	p-factor	دوره آماری		الگوریتم
۰/۷٦	۰/۸۹	۰/۸۳	۰/۸۱	۱۰ سال	واسنجی	SUFI-2
۰/٦۸	۰/۷۷	۰/۹۱	۰/۷٦	٤ سال	اعتبار سنجی	
۰/۷	۰/۸۲	۰/۸	۰/۹۲	۱۰ سال	واسنجی	GLUE
۰/٦۲	۰/٦۹	۰/۹۱	۱/۱٥	٤ سال	اعتبار سنجی	

جدول ٤- مقادیر و طبقات شاخص‌های R^2 و NS.

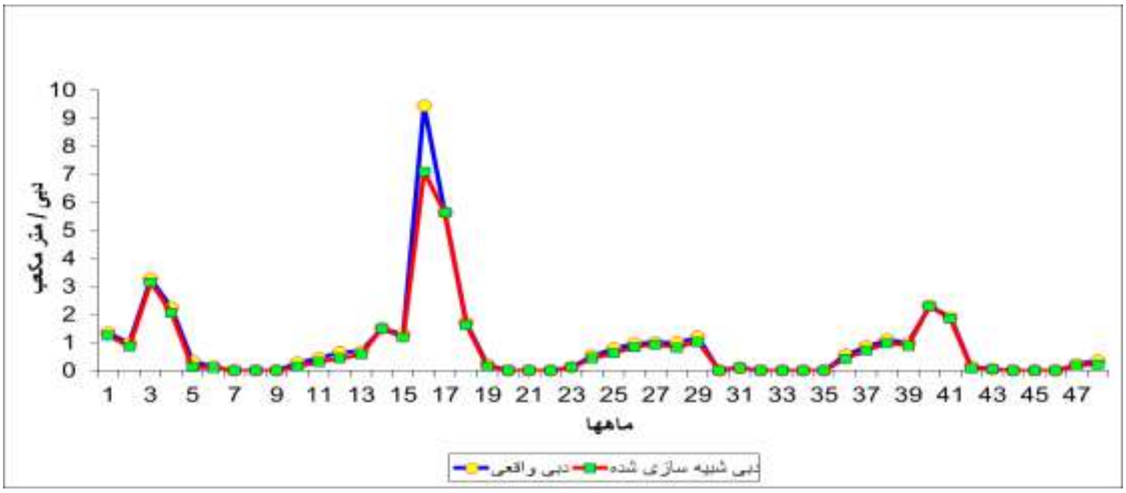
طبقات	مقادیر	شاخص
ناکار آمد	۰/٥	R^2
رضایتبخش	۰/٥ –۰/٦	
خوب	۰/٦ –۰/۷	
خیلی	۰/۷ –۱	
ناکار آمد	<۰/٤	NS
قابل قبول	۰/٤ – ۰/٥	
رضایت	۰/٥ –۰/٦٥	
خوب	۰/٦٥ –۰/۷٥	
خیلی	۰/۷٥ –۱	

منبع: موریاسی و همکاران (۲۰۰۷)، آی آل (۲۰۱۷) و کرمی و بیاتی خطیبی (۱۳۹۸).

هر چند کاربرد روش SUFI-2 آسـان می‌باشـد ولی کاملاً خود کار نیست در استفاده از این روش لازم است توزیع پسـین عوامل در هر تکرار جهت اصـلاح بازه پیشنهادی جدید (توزیع پیشین) تکرار بعدی بررسی گردد. واسنجی مدل برای رواناب در یک مرحله با تعداد ۹۰۰ شـبیه‌سـازی در سه تکرار انجام گردید فرآیند واسنجی زمانی به پایان می‌رسد که براسـاس تابع هدف ضـرایب مورد نیاز جهت ارزیابی در حد قابل قبول باشـند (جدول ۳). اشـکال ۲ و ۳ دبی شـبیه‌سـازی شـده و مشـاهده‌ای را به ترتیب در واسـنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد. تمام معیارهای ارزیابی مدل در شبیه‌سازی رواناب در حد مجاز می‌باشد.

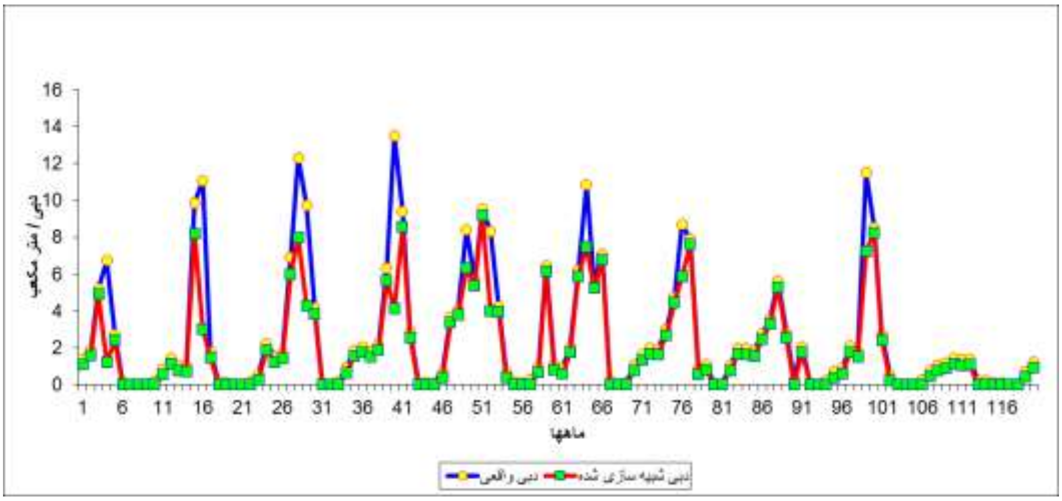


شکل ۳- نمودار دبی واقعی و شبیه‌سازی شده به روش SUFI-2 در مرحله واسنجی.

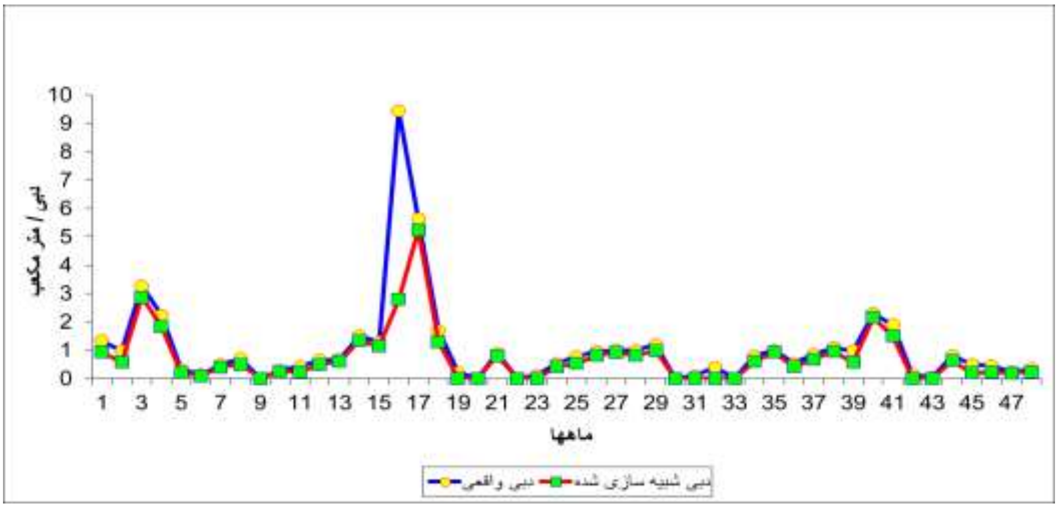


شکل ٤- نمودار دبی واقعی و شبیه‌سازی شده به روش SUFI-2 در مرحله اعتبار سنجی.

روش GLUE نسـبت به روش SUFI-2 آسان‌تر است و کاربرد آن راحت‌تر می‌باشد. در این پژوهش مقدار آستانه تابع هدف NS برابر ۰/٤ انتخاب گردید. این روش با تعداد نمونه گیری ٤۰۰۰، ۸۰۰۰ و ١٦۰۰۰ انجام گردید نتایج نشـان داد با تعداد نمونه گیری ۸۰۰۰ عملکرد بهتری نشـان می‌دهد. اشـکال ٤ و ٥ دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای را به ترتیب در واسـنجی و اعتبارسـنجی نشان می‌دهد. تمام معیارهای ارزیابی مدل در شبیه‌سازی رواناب در حد مجاز می‌باشـد ولی مقایسه دو روش نشان می‌دهد روش SUFI-2 نسبت روش GLUE در این حوضه عملکرد بهتری دارد.



شکل ٥- نمودار دبی واقعی و شبیه‌سازی شده به روش GLUE در مرحله واسنجی.



شکل ٦- نمودار دبی واقعی و شبیه‌سازی شده به روش GLUE در مرحله اعتبار سنجی.

مقایسـه گرافیگی، مقادیر دبی واقعی و شـبیه‌سـازی شـده در مقیاس ماهانه نشـان می‌دهد که مدل SWAT در شـبیه‌سـازی روانـاب، جریـان‌هـای حـداکثر را کمتر از حـد واقعی برآورد می‌کند. اکثر جریان‌های که مدل قادر به

شبیه‌سازی آن‌ها نبوده در اواخر زمستان و فصل بهار بوده‌اند یکی از دلایل ضعف مدل در برآورد حداکثر جریان رواناب استفاده از مدل سازمان حفاظت خاک[1] در محاسبه رواناب است که این مدل بخوبی رواناب حاصل از ذوب برف را شبیه‌سازی نمی‌کند اخوان و همکاران (۱۳۹٤) و انصاری و همکاران (۱۳۹۲) گزارش کرده‌اند که اکثر جریان‌هایی که مدل قادر به شبیه‌سازی آن‌ها نبوده در فصل بهار اتفاق می‌افتد. مدل SWAT بارش را با استفاده از متوسط دمای روزانه به‌صورت باران یا برف تقسیم بندی می‌کند. با توجه به ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب ماهانه اسفند، فروردین و اردیبهشت و تقدم جریان شبیه‌سازی شده فروردین در بعضی از سال‌ها می‌توان نتیجه گرفت که مدل قادر به شبیه‌سازی کامل ذوب برف نبوده و مقادیر حداکثر رواناب را برای این حوضه کوهستانی در ماه‌های مذکور شبیه‌سازی نکرده است. در این مدل هنگامی که رطوبت موجود در هر لایه خاک از گنجایش زراعی بیشتر باشد مقداری از این آب اضافی باعث ایجاد جریان جانبی می‌شود و قسمتی هم به لایه بعدی نفوذ می‌کند؛ اما هنگامی که لایه‌ای از خاک یخ زده باشد مدل فرض می‌کند که هیچ جریان جانبی اتفاق نمی‌افتد و لایه خاک می‌تواند آب اضافه بر گنجایش زراعی را تا زمانی که اشباع شود در خود نگه دارد. سپس فرض می‌کند که رطوبت مازاد بر گنجایش زراعی می‌تواند از لایه اشباع یخ زده به لایه بعدی نفوذ کند. (Tolson and Shoemaker,. 2004) بیان نمودند که مدل SWAT برای شبیه‌سازی وقایع شدید طراحی نشده و معمولاً حداکثر جریان را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند (Chu & Shirmohammadi, 2004) در پژوهشی در مریلند نشان دادند که مدل SWAT قادر نیست شرایط هیدرولوژیک را در دوره‌های تر سالی شبیه‌سازی کند. ازجمله علل دیگر ضعف مدل در نظر نگرفتن درصد تراکم پوشش گیاهی است که در این مدل صرفاً به نوع پوشش گیاهی اشاره شده است. از دلایل دیگر ضعف مدل در شبیه‌سازی جریان در بعضی از ماهها ی سال می‌توان به تعداد داده‌های کم جریان، و فقدان داده‌های ورودی لازم برای شبیه‌سازی آب زیر زمینی اشاره کرد.

٦- جمع بندی

با توجه به نتایج حاصل از حساسیت سنجی، چگالی توده خاک، هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع، ضریب تبخیر آب زیر زمینی، ثابت تخلیه جریان از کانال، درجه حرارت ریزش برف، درجه حرارت ذوب برف حساسیت بیشتری دارد. هم چنین بررسی نتایج حاصل از کاربرد دو روش SUFI-2 و GLUE در حوضه آبریز لنبران نشان داد، که بر اساس معیارهای ارزیابی ضریب تبیین و نش-ساتکلیف، روش SUFI-2 هم در مرحله واسنجی و هم در مرحله اعتبار سنجی نتایج خوبی نسبت به روش GLUE در این حوضه دارد. هم چنین هر دو روش نمی‌توانند دبی‌های اوج را بخوبی پیش‌بینی کنند زیرا هر دو روش در دبی‌های اوج دبی، را نسبت به دبی واقعی کمتر پیش‌بینی کرده‌اند. از دلایل ضعف مدل در شبیه‌سازی جریان در بعضی از ماه‌های سال می‌توان به شبیه‌سازی ضعیف ذوب برف، ناسازگاری

1 Soil Conservation Service

فرضیات مدل در انتقال جریان در لایه‌های یخ زده و اشباع، تعداد کم داده‌های جریان و فقدان داده‌های ورودی لازم برای شبیه‌سازی آب زیر زمینی اشاره نمود. هر چند کاربرد روش GLUE در مقایسه با روش SUFI-2 آسان‌تر می‌باشد ولی در روش GLUE تعداد شبیه‌سازی جهت رسیدن به جواب بیشتر است؛ بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده درنهایت می‌توان گفت که روش SUFI-2 با تعداد شبیه‌سازی کم در مقایسه با روش GLUE در این حوضه نتایج بهتری نشان می‌دهد. برای مشخص شدن کارایی بهتر مدل، پیشنهاد می‌شود اولاً از آمار ایستگاه‌های دبی سنجی متعدد و دبی روزانه به جای دبی ماهانه، در صورت وجود در یک حوضه استفاده شود تا نتایج آن‌ها با هم مقایسه شوند. ثانیاً برای رسیدن به نتایج مطلوب این مدل بصورت مقایسه‌ای با سایر مدل‌های شبیه‌سازی در این حوضه و حوضه‌های همجوار استفاده گردد.

کتابنامه

اخوان، سمیرا، عابدی کوپایی، جهانگیر، موسوی، سید فرهاد، عباس پور، کریم، افیونی، مجید و اسلامیان، سید سعید؛ ۱۳۹۰. تخمین «آب آبی» و «آب سبز» با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبریز همدان- بهار. *نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب‌وخاک*. سال چهاردهم. شماره ۵۳. صص ۲۳-۹.

اعلمی، محمد تقی؛ عباسی، حبیبه و نیک سخن، محمد حسین؛ ۱۳۹۷. مقایسه دو روش متفاوت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT در برآورد میزان رواناب و بار مواد معلق حوضه صوفی چای. *نشریه دانش آب‌وخاک*. جلد ۲۸. شماره ۳. صص ٦٤-۵۳.

اکبری مجدر، حسین؛ بهره مند، عبدالرضا؛ نجفی نژاد، علی و واحد بردی، شیخ؛ ۱۳۹۲. شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه چهل چای استان گلستان با مدل SWAT؛ *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک*. شماره ۳. صص ۲۵۳-۲۵۹.

انصاری، محمدرضا، گرجی، منوچهر، صیاد، غلام عباس، شرفا، مهدی و حمادی کاظم؛ ۱۳۹۳. شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز رود زرد با استفاده از مدل SWAT. *نشریه علوم و مهندسی آبیاری*. جلد ۳۸. شماره ٤. زمستان صص ۱۰۷-۹۷,۱۳۹٤.

بسالت پور، علی اصغر؛ ایوبی، شمس ا...؛ حاج عباسی، محمدعلی و جلالیان، احمد؛ ۱۳۹۳. واسنجی و اعتبار سنجی مدل SWAT با استفاده از الگوریتم پرندگان برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در یک حوضه آبخیز کوهستانی؛ *نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار*. جلد چهارم. شماره چهارم. ۱۳۹۳. صص ۳۱۲-۲۹۵.

بصیری، مرضیه؛ اسفندیار پور بروجنی، عیسی؛ اخوان، سمیرا؛ حمیدپور، محسن و کمالی، اردوان؛ ۱۳۹۳. تأثیر مقیاس نقشه خاک بر مدل SWAT در شبیه‌سازی روند جریان رواناب ماهانه در حوضه آبخیز تویسرکان؛ *نشریه مدیریت خاک. تولید پایدار*. جلد چهارم. شماره سوم. ۱۳۹۳. صص ۱۵۳-۱۳۵.

بیات، مهراد؛ علیزاده، حسین و مجردی، برات؛ ۱۳۹۷. جذب داده برای واسنجی - پیش‌بینی با استفاده از مدل SWAT؛ *نشریه تحقیقات منابع آب ایران*. سال چهاردهم. شماره ۱. بهار ۱۳۹۷. صص ۱۲-۱.

حبیبی، علیرضا و گودرزی، مسعود؛ ۱۳۹۷. کاربرد مدل نیمه توزیعی SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه حبله رود. *نشریه علوم مهندسی و آبخیز داری*. سال دوازدهم. شماره ۴۳. زمستان ۱۳۹۷. صص ۴۹-۴۰

رضازاده، محمد سهیل، بختیاری، بهرام، عباسپور، کریم، احمدی، مهدی و احمدی، محمد؛ ۱۳۹۶. شبیه‌سازی رواناب، رسوب و تبخیر- تعرق با استفاده از سناریوهای مدیریتی برای کاهش بار رسوب با استفاده از مدل SWAT. *نشریه علوم مهندسی آبخیزداری ایران*. سال دوازدهم. شماره ۴۰. بهار ۱۳۹۷. صص ۵۰-۴۱.

زارع گاریزی، آرش و طالبی، علی؛ ۱۳۹۵. شبیه‌سازی بیلان آب حوضه آبریز با استفاده از مدل SWAT مطالعه موردی: حوضه قره سو استان گلستان. *نشریه علوم مهندسی منابع آب*. سال نهم.۵۰ پاییز ۱۳۹۵. صص ۵۰-۳۷.

شفیعی مطلق، خسرو؛ پر همت، جهانگیر؛ صدقی، حسین و حسینی، مجید؛ ۱۳۹۷. بررسی تغییر کاربری بر رواناب رودخانه مارون در ایستگاه ایدنک با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و مدل SWAT؛ *نشریه حفاظت منابع آب‌وخاک*. سال هفتم. شماره سوم. بهار ۱۳۹۷. صص ۸۷-۷۱.

عارفی اصل، اکرم؛ نجفی نژاد، علی و سلمان ماهینی، عبدالرسول؛ ۱۳۹۲. شبیه‌سازی رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبخیز چهل چای استان گلستان. *نشریه مرتع و آبخیز داری*. دوره ٦٦. شماره ۳. پاییز ۱۳۹۲. صص ٤٤٦-٤٣٣.

عینی، محمدرضا، جوادی، سامان و دلاور مجید؛ ۱۳۹۷. ارزیابی عملکرد داده‌های باز تحلیل شده پایگاه‌های اقلیمی جهانی CRU و NCEP CFSR در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی مدل SWAT مطالعه موردی: حوضه آبریز مهارلو. *نشریه تحقیقات منابع آب ایران*. سال چهاردهم. شماره ۱. بهار ۱۳۹۷. صص ٤٤-٣٢.

غلامی، عباس؛ شاهدی، کاکا؛ حبیب نژاد روشن، محمود؛ وفاخواه، مهدی و سلیمانی، کریم؛ ۱۳۹٦. ارزیابی کارایی مدل نیمه توزیعی SWAT در شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای (مطالعه موردی: حوضه آبخیز تالار استان مازندران)؛ *نشریه تحقیقات آب‌وخاک ایران*. دوره ٤٨. شماره ۳. مهر و آبان ۱۳۹٦. صص ٤٧٦-٤٦٣.

کاویان، عطا الله، گلشن، محمد، روحانی، حامد و اسمعلی عوری، اباذر؛ ۱۳۹۲. شبیه‌سازی رواناب و بار رسوب حوضه آبخیز رودخانه هراز مازندران با بهره گیری از الگوی SWAT *نشریه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*. دوره ٤٧. شماره۲. تابستان ۱۳۹٤. صص ۲۱۱-۱۹۷.

کرمی، فریبا و بیاتی خطیبی مریم؛ ۱۳۹۸. مدل‌سازی فرسایش خاک و اولویت بندی تولید رسوب در حوضه سد ستارخان اهر با استفاده از مدل‌های MUSLE و SWAT. *نشریه هیدروژئومورفولوژی*. شماره ۱۸. سال ۵. بهار ۱۳۹۸. صص ۱۳۷-۱۱۵.

گودرزی، محمدرضا و فاتحی فر، آتیه؛ ۱۳۹۸. پهنه‌بندی خطر سیلاب در اثر تغییرات اقلیمی تحت سناریو RCP 8.5 با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT در محیط GIS (حوضه آذرشهرچای). *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*. سال نوزدهم. شماره ۵۳. تابستان ۹۸. صص ۱۱۷-۹۹.

محمدی، مازیار؛ کاویان، عطاا... و غلامی، لیلا؛ ۱۳۹٦. شـبیه‌سـازی دبی و نیترات در حوزه آبخیز تالار با استفاده از مدل SWAT. *نشریه پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز*. سال هشتم. شماره ۱۵. بهار و تابستان ۱۳۹٦. صص ٦۰–٤۵.

مؤذن زاده، روزبه؛ قهرمان، بیژن؛ ارشـد، صالح و داوری، قهرمان؛ ۱۳۹۵. بهبود مدل‌سازی حوضه آبریز از طریق تجمیع مؤلفه‌های اصـلی هیدرولوژیک در مدل SWAT. *نشـریه تحقیقات منابع آب ایران*. سال دوازدهم. شماره ۳. پاییز ۱۳۹۵. صص ۷۹–٦۵.

ناصـرآبادی، فؤاد؛ اسـمعلی عوری، اباذر؛ اکبری، حسـین و رسـتمیان، رخسـاره؛ ۱۳۹٦. شـبیه‌سازی جریان رودخانه با اسـتفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: رودخانه قره سو اردبیل). *نشریه پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز*. سال هفتم. شماره ۱۳. بهار و تابستان ۱۳۹۵. صص ۵۹–۵۰.

نظری پویا، هادی؛ کردوانی، پرویز و فرجی راد، عبدالرضـــا؛ ۱۳۹٤. واســـنجی و ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژی IHACRES و SWAT در شـبیه‌سـازی رواناب. *نشـریه تحلیل فضـایی مخاطرات محیطی*. سال دوم. شماره ۲. تابستان ۱۳۹٤. صص ۱۱۲–۹۹.

Abbaspour K.C, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner J, Zobrist J, Srinivasan R. 2007.

Ayele, G.T., Teshale, E.Z., Yu, B., Rutherfurd, I.D., Jeong, J., 2017. Streamflow and Sediment Yield

Beven, K., and A. Binley., 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol Proc*. 6: 279-298.

Chu, T. W. and A. Shirmohammadi., 2004. Evaluation of the SWAT model’s hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. Transactions of the ASAE, 47(4): 1057-1073.

Faramarzi M, Abbaspour K.C, Schulin R, Yang H., 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. Hydrological Processes 23: 486–501.

Grusson Y, Anctil F, Sauvage S, Sánchez Pérez J., 2017. Testing the swat model with gridded weather data of different spatial resolutions. Water, 9(1):54

Li, K.Y., Coe, M.T., Ramankutty, N., and De Jong, R., 2007. Modeling the hydrological impact of landchange in West Africa, J. of Hydro., 337: 258-268.

Modelling hydrology and watershed using SWAT. Journal of Hydrology 333 (2-4), 413–430.

Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50(3): 885–900.

Motovilov Y.G., Gottschalk, L., Engeland, K., and Rodhe, A., 1999. “Validation of a distributed Hydrological Model against Spatial Observations” Agricultural and Forest Meteorology, 98-99, 257-277.

Ndomba, P.M., Mtalo, F.W. and Killingtveit, A., 2008. "A Guided SWAT Model Application.on Sediment Yield Modeling in Pangani River Basin: Lessons Learnt". Urban Environmental Engineering. Vol. 2. No. 2. pp. 53-62

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. and King, K.W., 2004. Soil and Water.Assessment Tool- Theoretical Documentation– version 2005. Texas. Agricultural Research Service. P. 494

Pisinaras, V., Petalas, C., Gikas, G. D., Gemitzi, A. and Tsihrintzis, V.A., 2010. "Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT)". Desalination. Vol. 250. No. 1. pp. 274–286.

Prediction for Watershed Prioritization in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia, Water, Vol.9, No,782, PP. 1-29.

Ritchie J.T. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resources Research 8: 1204-1213.

Setegn, S. G., Dargahi, B., Srinivasan, R. and Melesse, A. M., 2010. Modeling of Sediment Yield from Anjeni-Gauged Watershed, Ethiopia Using SWAT Model, JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 46(3), 514–526.

Shimelis, G.S., Dargahi, B., Srinivasan, R. and Melesse, A., 2010. "Modeling of Sediment Yield from Anjeni-Gauged Watershed, ETHIOPIA Using SWAT Model". The American Water Resources Association. Vol. 46. No. 3. pp. 514-526.

Silva, R.M., Santos, C.A.G. and Silva, L.P., 2007. "Evaluation of soil loss in Guaraira basin by GIS and remote sensing based model". Urban Environmental Engineering. Vol. 1. No. 2. pp. 44-52.

Sloan P.G, Morre I.D, Coltharp G.B, Eigel J.D., 1983. Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds. Water Resources Research Institute, Report 142. University of Kentucky, Lexington.

Sun L, Nistor I, and Seidou O., 2015. Streamflow data assimilation in SWAT model using Extended Kalman Filter. Journal of Hydrology 531:671-684

Tolson, B. A. and C. A. Shoemaker., 2004. Watershed modeling of the cannonsville basin using SWAT2000: Model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the Cannonsville reservoir. Technical Report, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell Univ., Ithaca, N. Y.